

## AVALIAÇÃO DA VELOCIDADE RESIDUAL DE PROJÉTEIS EM COMPÓSITOS DE EPÓXI REFORÇADOS COM ESCAMAS DE PIRARUCU \*

*Luís Carlos Da Silva<sup>1</sup>  
Michelle Souza Oliveira<sup>2</sup>  
Fábio Da Costa Garcia Filho<sup>3</sup>  
LuanaCristyne Da Cruz Demosthenes<sup>4</sup>  
Wendell Bruno Almeida Bezerra<sup>5</sup>  
Sergio Neves Monteiro<sup>6</sup>*

### Resumo

As escamas do pirarucu (Arapaima Gigas) atuam como uma blindagem natural contra predadores como a piranha. A composição de suas escamas possui duas camadas, uma de cálcio e outra de colágeno, essa combinação possui uma característica de dureza capaz de resistir ao ataque das piranhas. Neste trabalho foi estudado a aplicação das escamas puras, coladas umas as outras, formando uma camada de aproximadamente 1 cm de espessura. Em outra análise, as escamas foram estudadas como material de reforço em compósito de matriz polimérica de epóxi. Foram produzidos 6 corpos de prova só de escamas e um compósito de matriz epoxídica com 30% de escamas em volume. Esse material foi submetido a um ensaio balístico, com munição de calibre 7,62 mm e a sua velocidade residual medida. De posse das medidas da velocidade de impacto e velocidade residual foi possível calcular a energia absorvida pelo compósito e a velocidade limite do projétil. Os resultados obtidos foram considerados superiores aos compósitos reforçados com outras fibras naturais de origem vegetal, conhecidas como fibras lignocelulósicas.

**Palavras-chave:** Blindagem balística; Pirarucu; Resina epóxi; Compósitos.

## EVALUATION OF RESIDUAL SPEED OF PROJECTS IN EPOXY COMPOSITES REINFORCED WITH PIRARUCU SCALES

### Abstract

The pirarucu scales (Arapaima Gigas) act as a natural armor against predators such as piranha. The composition of its scales has two layers, one of calcium and the other of collagen, this combination has a characteristic of hardness able to resist the attack of the piranhas. In this work the application of the pure scales, glued to each other, was studied, forming a layer of approximately 1 cm of thickness. In another analysis, the scales were studied as an epoxy polymer composite reinforcing material. Six scale-only specimens and an epoxy matrix composite with 30% volume scales were produced. This material was subjected to a ballistic test, with 7.62 mm caliber ammunition and its measured residual velocity. With the impact velocity and residual velocity measurements, it was possible to calculate the energy absorbed by the composite and the velocity of the projectile. The obtained results were considered superior to the reinforced composites with other natural fibers of vegetal origin, known as lignocellulosic fibers.

**Keywords:** Ballistic armor; Pirarucu; Epoxy resin; Composites.

- <sup>1</sup> *Engenheiro Químico, D.Sc., Doutor em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia - Instituto Militar de Engenharia, Praça General Tibúrcio, 80 22290-270, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- <sup>2</sup> *Engenheira Civil, Mestrando em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia - Instituto Militar de Engenharia, Praça General Tibúrcio, 80 22290-270, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- <sup>3</sup> *Engenheiro de Materiais, Mestrando em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia - Instituto Militar de Engenharia, Praça General Tibúrcio, 80 22290-270, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- <sup>4</sup> *Engenheira Civil, Mestrando em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia - Instituto Militar de Engenharia, Praça General Tibúrcio, 80 22290-270, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- <sup>5</sup> *Engenheiro de Materiais, Mestrando em Ciência dos Materiais, IME - Instituto Militar de Engenharia, Praça General Tibúrcio, 80 22290-270, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- <sup>6</sup> *Ph.D. em Engenharia e Ciências dos Materiais, Seção de ensino de Ciência e engenharia de Materiais, IME - Instituto Militar de Engenharia, Praça General Tibúrcio, 80 22290-270, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

As escamas dos peixes exercem a função de uma blindagem natural, flexível e que vem recebendo uma atenção crescente da comunidade científica [1]. Uma dessas espécies de peixe, *Arapaima gigas*, conhecido popularmente como pirarucu, ocorre em bacias dos rios Amazonas e Tocantins e é um dos mais importantes e emblemáticos peixes da Amazônia. Historicamente, esta espécie, que cresce até 2 m em comprimento e pode pesar mais de 100 kg, tem desempenhado um importante papel na economia pesqueira da Amazônia [2].

O pirarucu tem despertado o interesse da comunidade científica, devido ao papel importante de suas escamas na proteção contra predadores como as piranhas. As escamas do pirarucu possuem uma estrutura laminada composta por uma camada externa mineralizada e camadas internas com espessuras que variam de 50 a 60  $\mu\text{m}$  composta por fibras de colágeno [3].

As fibras de colágeno são paralelas com diferentes orientações. Esse arranjo inibe a propagação de trincas e restringe os danos à uma pequena área próxima à penetração [4]. A maioria dos testes mecânicos realizados em escamas de peixe foi por ensaio de tração [5].

Torres e colaboradores [6] mediram o limite de resistência à tração e o módulo de elasticidade das escamas do pirarucu, secas e úmidas e descobriu que o módulo de elasticidade para as escamas secas é de 1,38 GPa enquanto o módulo de elasticidade das escamas úmidas é de 0,83 GPa. Lin e colaboradores [3] também realizaram o mesmo ensaio de tração nas escamas de pirarucu e encontraram valores de módulo de elasticidade de 1,2 GPa para escamas secas e 0,1 GPa para escamas úmidas.

## 2 MATERIAS E MÉTODOS

### 2.1 Escamas de Pirarucu

As escamas de pirarucu foram obtidas no Mercado Municipal Adolpho Lisboa, localizado na cidade de Manaus. A densidade das escamas foi determinada pelo método de Arquimedes como  $\rho = 1,60 \text{ g/cm}^3$ .

Inicialmente as escamas apresentavam um formato côncavo, o que dificultava a preparação de um compósito de matriz epóxi com essas fibras e até mesmo à colagem das escamas puras. Para melhorar esse aspecto, as escamas foram umedecidas, tornando-se bastante maleáveis, e depois submetidas a uma pressão de um corpo metálico sobre elas durante 24 horas em uma estufa à 100 °C. Após esse procedimento às escamas se encontravam secas, alinhadas e rígidas novamente.

As escamas foram coladas umas as outras com uma cola à base de poliuretano da marca Golden Glass, de forma que o sistema tivesse aproximadamente 1 cm de espessura, que é à espessura equivalente ao compósito e à outras blindagens pesquisadas em outros trabalhos. O resultado pode ser observado na Figura 1. Foram produzidos seis corpos de provas apenas com escamas.

**Figura 1.** Escamas puras de pirarucu usadas para blindagem balística.

## **2.2 Compósito de matriz de epóxi reforçados com escamas de pirarucu**

Para confecção do compósito, as escamas secas e planificadas foram distribuídas em um molde metálico com dimensões 15 x 12 x 1,19 cm, enquanto uma resina de epóxi era vertida nessa matriz. A proporção do compósito foi de 30% de escamas em volume e o tempo de cura foi de 24 horas. Foi confeccionado um corpo de prova e os ensaios balísticos foram realizados, com quatro tiros nessa amostra. Os ensaios balísticos foram realizados no Centro de Avaliações do Exército (CAEx). Foi utilizado um radar Doppler WEIBEL SL-520P como demonstrado na Figura 2.



**Figura 2.** Radar Doppler, modelo SL-520 P, utilizado nessa pesquisa [4].

## 2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após os ensaios, foram registrados os dados de velocidade de impacto ( $v_i$ ), que é a velocidade do projétil antes da penetração e bem próximo do alvo, e à velocidade residual ( $v_r$ ), que é à velocidade após a penetração no alvo. Com esses dados foi possível calcular a energia absorvida ( $E_{ABS}$ ) e a velocidade limite ( $v_l$ ), que é à velocidade máxima que o projétil pode ter sem conseguir penetrar totalmente na blindagem. A energia absorvida e a velocidade limite podem ser calculados pelas Equações 1 e 2 respectivamente.

$$E_{ABS} = \frac{1}{2} m (v_i^2 - v_r^2) \quad (1)$$

$$v_l = \sqrt{\frac{2E_{ABS}}{m}} \quad (2)$$

Considerando  $m = 9,7$  g, que é a massa do projétil calibre 7,62 mm. A Tabela 1 apresenta todos os dados registrados ( $v_i$  e  $v_r$ ) e os dados calculados ( $E_{ABS}$  e  $v_l$ ), das amostras desse estudo.

**Tabela 1.** Energia absorvida e velocidade limite das amostras

	Velocidade de impacto (m/s)	Velocidade residual (m/s)	Energia absorvida (J)	Velocidade limite (m/s)
Compósito 30% escamas	837,52 ± 7,02	804,77 ± 13,82	260,33 ± 63,64	230,30 ± 29,21
100% escamas	843,51 ± 4,33	786,23 ± 50,12	442,68 ± 400,68	276,31 ± 133,84

As energias absorvidas e a velocidade limite encontram-se com valores superiores, ao epóxi puro e de outros compósitos de fibra natural como o curauá e o sisal, como podemos perceber na Tabela 2 abaixo.

**Tabela 2.** Comparação entre compósitos de fibras naturais

Compósito	Energia absorvida (J)	Velocidade Limite (m/s)
Epóxi/30% escamas	260,33 ± 63,64	230,30 ± 29,21
Epóxi 100% [7]	190,10 ± 61,5	197,98
Epóxi/30% fibras de curauá [7]	106,16 ± 10,90	147,95
Epóxi/30% fibras de sisal [8]	171	188

As amostras contendo apenas escamas puras apresentaram um resultado compatível á outras blindagens de compósitos, como o compósito reforçado com 30% de fibras de sisal e até mesmo o compósito puro.

## 3 CONCLUSÃO

A Tabela 2 demonstra que às escamas de pirarucu, absorvem uma quantidade de energia cinética do projétil, tendo uma eficiência melhor ou equivalente à outros compósitos feitos de fibra natural. Essa resistência elevada, é devido ao colágeno na sua composição e às ranhuras que compõem à sua superfície pois representam barreiras à propagação de trincas após o impacto do projétil.

## Agradecimentos

- Ao Instituto Militar de Engenharia (IME) pela infraestrutura na confecção dos corpos de prova.
- Ao Centro de Avaliações do Exército (CAEx) pela infraestrutura na realização dos ensaios balísticos.
- Ao CNPq pelo apoio financeiro nessa pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- 1 Arola D, Murcia S, Stossel M, Pahuja R, Linley T, Devaraj A, Ramulu M, Ossa EA, Wang J. The limiting layer of fish scales: Structure and properties, *ActaBiomaterialia*, 67 (2018), 319-330.
- 2 Feijó MM, Arana S, Ceccarelli PS, Adriano EA. Light and scanning microscopy of *Heneguya arapaima* n. sp. (Myxozoa: Myxobolidae) and histology of infected sites in pirarucu (*Arapaima gigas*: Pisces: Arapaimidae) from the Araguaia River, Brazil, *Veterinary Parasitology*, 157 (2008) 59-64.
- 3 Lin YS, Wei CT, Olevsky EA, Meyers MA. Mechanical Properties and the laminate structure of *Arapaima gigas* scales, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 4 (2011), 1145-1156.
- 4 Yang W, Sherman VR, Gludovatz B, Mackey M, Zimmermann EA, Chang EH, Schaible E, Qin Z, Buehler MJ, Ritchie RO. Protective role of *Arapaima gigas* fish scales: Structure and mechanical behavior, *ActaBiomaterialia*, 10 (2014) 3599-3614.
- 5 Torres FG, Malásquez M, Troncoso OP. Impact and fracture analysis of fish scales from *Arapaima gigas*. *Materials Science and Engineering*, C 51 (2015) 153-157.
- 6 Torres FG, Troncoso, Nacamatsu J, Grande CJ, Gómez CM. Characterization of the nanocomposite laminate structure occurring in fish scales from *Arapaima gigas*. *Materials Science and Engineering*, C 28 (2008) 1276-1283.
- 7 Silva LC, Comportamento balístico de compósitos epóxi-fibra natural em blindagem multicamada. Tese de Doutorado em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, 2014, 1-134.
- 8 Bolzan LT, Avaliação do comportamento balístico de um sistema de blindagem multicamada com compósito de poliéster reforçado com fibra e tecido de sisal.